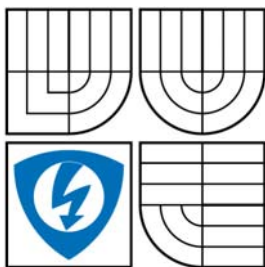


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

NÁVRH PAŽE ROBOTA A ANALÝZA JEHO KINEMATIKY

ROBOT ARM DESIGN AND ANALYSIS OF ITS KINEMATICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

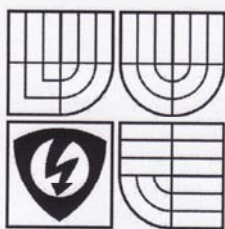
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN MEZEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ SEKORA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Jan Mezek

Ročník: 3

ID: 119728

Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Návrh paže robota a analýza jeho kinematiky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte kinematiku otevřených kinematických řetězců. Navrhněte s ohledem na úlohu manipulace laboratorního robota a možná omezení vyplývající z modelu scény (manipulační prostor) kinematický řetězec paže robota, zdůvodněte svůj návrh. Vypočítejte celkový kinematický model paže robota v prostředí Matlab - toolbox Symbolic, tj. transformace poloh, rychlostí a zrychlení středů kinematických dvojic vůči rámu. Správnost výpočtu kinematického modelu ověřte simulací v prostředí Matlab. Proveďte syntézu kinematického zákona řízení, respektive volbu a ověření některého vhodného paradigmatu řízení paže laboratorního robota simulací v Matlabu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Sciavicco, L., Siciliano, B.: Modeling and control manipulators. International Editions 1996, Italy.
- [2] Fischer, J., Kacer, J., Kauler, J.: Kinematika pohybu robotických systémů. Skripta VA, Brno 2004.
- [3] Loprais, A.: Mechanika manipulačních zařízení. Skriptum, VUT Brno 1988.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sekora

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Mezek
Bytem: Na Výhledu 1429, 253 01 Hostivice
Narozen/a (datum a místo): 21.2.1982, Praha 2

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ dizertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh paže robota a analýza jeho kinematiky

Vedoucí/školicitel VŠKP: Ing. Jiří Sekora

Ústav: Ústav biomedicínského inženýrství

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Návrh paže robota a analýza jeho kinematiky

Bakalářská práce

Specializace: Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Jan Mezek

Vedoucí: Ing. Jiří Sekora

Abstrakt

Cílem mé bakalářské práce je seznámit se s návrhem otevřených kinematických řetězců. Navrhnout s ohledem na úlohu manipulaci laboratorního robota (manipulační prostor) kinematický řetězec robota. Vypočítat celkový kinematický model paže robota. Správnost výpočtu kinematického modelu ověřím simulací v prostředí Matlab. Pro simulace je nutné navrhnout řízení pro robotickou paži. Syntézou kinematického zákona řízení ověřím správnost výpočtu kinematického modelu paže robota a jeho řízení.

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Biomedical Engineering

Robot Arm Design and analysis of its kinematics

Bachelor's thesis

Specialisation of study: Biomedical technic and bioinformatics
Student: Jan Mezek
Supervisor: Ing. Jiří Sekora

Abstract

The goal of my bachelor project is to acquaint with the design of an open linkage. Put up the linkage regarding the exercise of manipulation the laboratory robot (operating space). Figure out total linkage of the robots arm. I will verify the correctness of the linkage calculation by computer simulation in Matlab. For the simulation is necessary to put up the proceedings for the robotic arm. To verify the rightness of the calculation of the kinematic model of robotic arm and its proceedings I will use the incorporation of kinematic law.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Návrh paže robota a analýza jeho kinematiky

Bakalářská práce

Specializace: Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Jan Mezek

Vedoucí: Ing. Jiří Sekora

Klíčová slova v českém jazyce :

Robot, kinematika, kinematická dvojice (člen), pracovní prostor, pohyb, vektor, rychlost, zrychlení, matice, matice rychlosti, matice zrychlení

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Biomedical Engineering

Robot Arm Design and analysis of its kinematics

Bachelor's thesis

Specialisation of study: Biomedical technic and bioinformatics
Student: Jan Mezek
Supervisor: Ing. Jiří Sekora

English keywords:

Robot, kinematic, kinematic pair (element), work area, movement, vector, rate, acceleration, matrix array, rate matrix, acceleration matrix

Bibliografická citace:

MEZEK, J. *Návrh paže robota a analýza jeho kinematiky: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. s. 54, 6 příl.. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Sekora

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Návrh paže robota a analýza jeho kinematiky jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2010

.....
podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Jiřímu Sekorovi, za konzultace při zpracovávání mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Kaulerovi, PhD. za odborné konzultace a realizaci mé bakalářské práce. Zároveň bych chtěl poděkovat všem odborným pracovníkům fakulty biomedicínského inženýrství za odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce a za jejich trpělivost při mém studiu.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	14
SEZNAM OBRÁZKŮ	15
SEZNAM TABULEK.....	16
1. ÚVOD.....	17
2. ZADÁNÍ PRÁCE	18
2.1 NASTUDUJTE KINEMATIKU OTEVŘENÝCH KINEMATICKÝCH ŘETĚZCŮ	18
2.2 NASTUDUJTE KINEMATICKÝ ŘETĚZEC PAŽE ROBOTA	18
2.3 SIMULAČNÍ MODEL V PROSTŘEDÍ MATLAB – SIMULINK	18
3. ÚVOD DO PROBLEMATIKY	19
3.1 ROZDĚLENÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ V SOUČASNOSTI.....	19
3.2 KINEMATICKÁ STRUKTURA	20
3.2.1 Pohyb manévrovací.....	20
3.2.2 Pohyb operační.....	21
3.2.3 Pohyb suboperační	21
3.3 ZÁKLADNÍ STAVBA	21
3.4 KINEMATICKÁ DVOJICE.....	22
3.5 PRACOVNÍ PROSTOR	24
3.6 PŘESNOST POLOHOVÁNÍ.....	25
4. ANALÝZA ÚLOHY MANIPULACE	26
4.1 PRACOVNÍ PROSTOR	27
4.1.1 Robot kartézský.....	28
4.1.2 Robot válcový.....	29
4.1.3 Vyhodnocení pracovního prostoru.....	30
4.2 POČET STUPŇŮ VOLNOSTI	30
5. SYNTÉZA KINEMATICKÉHO ŘETĚZCE	31
5.1 PARAMETRICKÉ ROVNICE POHYBU	31
5.1.1 Proměnné a konstantní souřadnice.....	33
5.1.2 Polohové vektory středů souřadnicových systémů.....	34
5.1.3 Pohyby jednotlivých členů	34
5.1.4 Transformační matice základních pohybů	35
5.2 RYCHLOSTNÍ MATICE	36
5.3 ODVOZENÍ JAKOBIÁNU	40
5.4 MATICE ZRYCHLENÍ	41
6. SIMULACE	42
6.1 ZÁKON ŘÍZENÍ	42
6.2 BLOKOVÉ SCHÉMA SIMULACE	43
6.2.1 Popis blokového schématu.....	43
6.3 POLOHA V ZOBECNĚNÝCH SOUŘADNICÍCH	44
6.4 RYCHLOST V ZOBECNĚNÝCH SOUŘADNICÍCH	45
6.5 ZRYCHLENÍ V ZOBECNĚNÝCH SOUŘADNICÍCH	46
7. ZÁVĚR	47

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
8. PŘÍLOHY	49
8.1 SCRIPT JAKOBIAN.M	49
8.2 SCRIPT PRIMA_KINEMATIKA.M	50
8.3 SCRIPT ANIMACE.M	51
8.4 SCRIPT PARSYS.M	52
8.5 SIMULACE	53
8.5.1 Počáteční poloha	53
8.5.2 Požadovaná poloha.....	54

Seznam použitých symbolů a zkratek

PR	průmyslový robot
$PRaM$	průmyslový robot a manipulátor
W_{sr}	počet stupňů volnosti
p_k, p_z, p_v	druhy vazeb tělesa
ω, α	úhlová rychlost, úhlové zrychlení
$\mathbf{r}_a^{O_b}$	poloha počátku souřadnicové soustavy O_b tělesa b vzhledem k tělesu a , vyjádřená v systému tělesa a
\mathbf{r}_b^M	poloha bodu M tělesa b vzhledem k počátku souřadnicové soustavy O_b tělesa b , vyjádřená v systému tělesa a
$\mathbf{s}_{ba} \cdot \mathbf{r}_b^M$	poloha bodu M tělesa b vzhledem k počátku souřadnicové soustavy O_b tělesa b , vyjádřená v systému tělesa b
\mathbf{T}_{ba}	transformační matice pohybu tělesa b vůči tělesu a
\mathbf{T}_{ba}^{-1}	transformační matice inverzního pohybu tělesa b vůči tělesu $a \Rightarrow$ transformační matice pohybu tělesa a vůči tělesu b
$\mathbf{v}_a^{O_b}$	rychlost přímočarého pohybu počátku souřadnicové soustavy O_b tělesa b vzhledem k tělesu a , vyjádřená v systému tělesa a
$\mathbf{\Omega}_{ba b}$	matice úhlových rychlostí pohybu tělesa b vůči tělesu a vyjádřená v systému tělesa b
$\mathbf{V}_{ba b}$	matice rychlosti pohybu tělesa b vůči tělesu a vyjádřená v systému tělesa b
$\mathbf{A}_{ba b}$	matice neúplného zrychlení pohybu tělesa b vůči tělesu a vyjádřená v systému tělesa b
$\mathbf{B}_{ba b}$	matice úplného zrychlení pohybu tělesa b vůči tělesu a vyjádřená v systému tělesa b

Seznam obrázků

OBR. 1: ROZDĚLENÍ PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ A MANIPULÁTORŮ	19
OBR. 2: ROZDĚLENÍ MANIPULAČNÍ ZAŘÍZENÍ	19
OBR. 3: ROZDĚLENÍ PRAM PODLE JEJICH POUŽITÍ	20
OBR. 4: POHYBY PRAM.....	20
OBR. 5: KINEMATICKÁ SOUSTAVA	22
OBR. 6: DRÁHA TĚŽIŠTĚ	24
OBR. 7: SCHÉMA PRACOVNÍHO PROSTORU	27
OBR. 8: POLOHOVACÍ ÚSTROJÍ KARTÉZSKÉHO ROBOTA	28
OBR. 9: POLOHOVACÍ ÚSTROJÍ VÁLCOVÉHO ROBOTA.....	29
OBR. 10: KINEMATICKÉ ŘETĚZEC ROBOTICKÉ PAŽE.....	33
OBR. 11: ZPĚTNOVAZEBNÍ SYSTÉM.....	42
OBR. 12: BLOKOVÉ SCHÉMA	43

Seznam tabulek

TAB. 1: KINEMATICKÁ DVOJICE	23
TAB. 2: HODNOTY CHYB ROBOTŮ	26
TAB. 3: MATICE ZÁKLADNÍCH POHYBŮ	32

1. Úvod

Průmyslové roboty a manipulátory výrazně ovlivňují výrobní činnost v mnoha průmyslových odvětvích (chemické, strojní, lékařské, atd.). Ve světovém měřítku se můžeme setkat jak s primitivními manipulátory, které vykonávají jednoduché manipulační pohyby, tak i s velice složitými inteligentními roboty, které se dokáží samostatně řídit. Tyto manipulátory jsou schopny např. montáže strojních celků nebo svařování jednotlivých součástí automobilů. V dnešní době jsou robotické systémy tak vyvinuté, že mohou vykonávat i tak složité výkony, jako je operace člověka. V současnosti za špičku v oblasti robotiky můžeme považovat robotický systém pro miniinvazivní chirurgii daVinci od firmy Hospimed. Průmyslové roboty se používají ve velkosériové výrobě pro vykonávání stereotypních úkonů, které jsou pro člověka velmi náročné. S těmito roboty se můžeme setkat i v malosériové výrobě nebo i ve zcela odlišných oblastech vědy a techniky.

Mým úkolem bylo navrhnout paži robota, analyzovat úlohu manipulace robota, provést syntézu kinematického řetězce a na závěr navrhnout zákon řízení jej odsimulovat v prostředí Matlab – Simulink.

V první části práce uvede čtenáře do oblasti kinematiky, řešení kinematických dvojic a kinematických soustav. Dále podám stručný přehled a popis principů výpočtu otevřených kinematických řetězců a kinematických soustav pomocí maticového počtu tak, abych dostal kompletní kinematický popis manipulace robota. V další části se zabývám samotným návrhem úlohy robota. Vytvořím kinematický model a určím jednotlivé transformační matice kinematických dvojic robota. Na závěr navrhnu řízení a s kinematickým modelem ověřím simulací řízení i kinematický model jako celek v prostředí Matlab – Simulink.

2. Zadání práce

2.1 Nastudujte kinematiku otevřených kinematických řetězců

Nastudujte kinematiku otevřených kinematických řetězců pro návrh paže robota.

2.2 Nastudujte kinematický řetězec paže robota

Navrhněte s ohledem na úlohu manipulace laboratorního robota a možná omezení vyplývající z modelu scény (manipulační prostor) kinematický řetězec paže robota, zdůvodněte svůj návrh. Vypočítejte celkový kinematický model paže robota v prostředí Matlab – toolbox Symbolic, tj. transformace poloh, rychlostí a zrychlení středů kinematických dvojic vůči rámu.

2.3 Simulační model v prostředí Matlab – Simulink

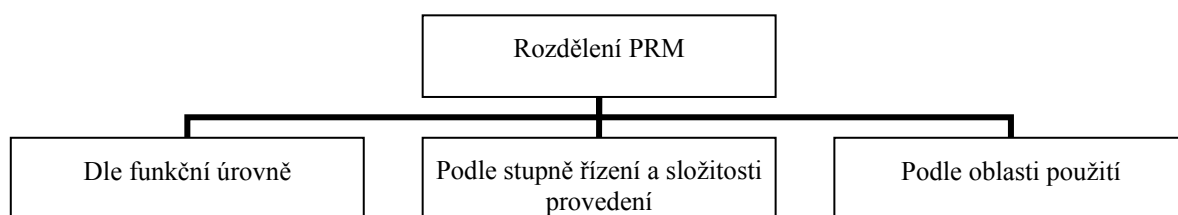
Správnost výpočtu kinematického modelu ověřte simulací v prostředí Matlab. Proved'te syntézu kinematického zákona řízení, respektive volbu a ověření některého vhodného paradigmatu řízení paže laboratorního robota simulací v Matlabu.

3. Úvod do problematiky

Pro lepší pochopení funkcí robotů a jejich využití, si musím nejprve rozdělit a popsat jednotlivé průmyslové roboty a manipulátory. Poté se budu zabývat samotnou analýzou manipulace paže robota.

3.1 Rozdělení průmyslových robotů v současnosti

Průmyslové roboty můžeme rozdělit podle několika vlastností. Nejzákladnější rozdělení PRaM je dle následujícího obr. 1 do tří základních skupin.

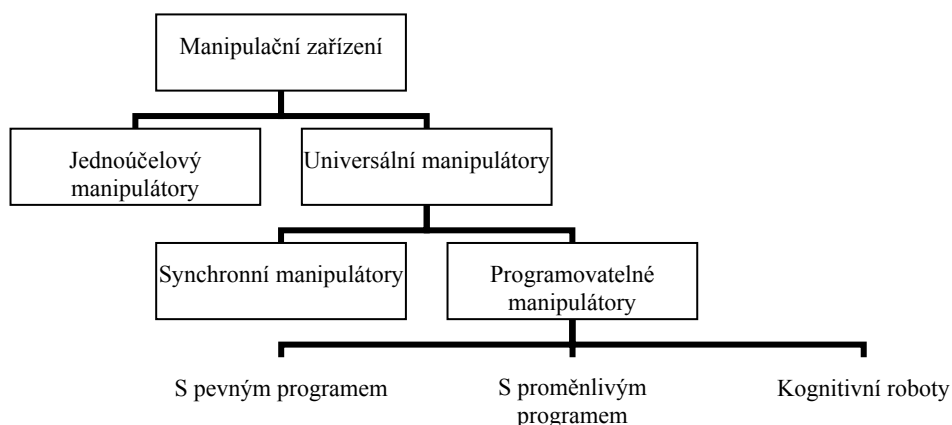


Obr. 1: Rozdělení průmyslových robotů a manipulátorů¹

Manipulační roboty jsou označovány jako průmyslové roboty určené pro vykonávání operací změny polohy objektů, orientace či upnutí.

Universální roboty jsou schopny plnit současně manipulační, technologické a další funkce ve výrobním prostoru.

Rozdělení podle složitosti jejich řízení je zobrazeno na obr. 2.

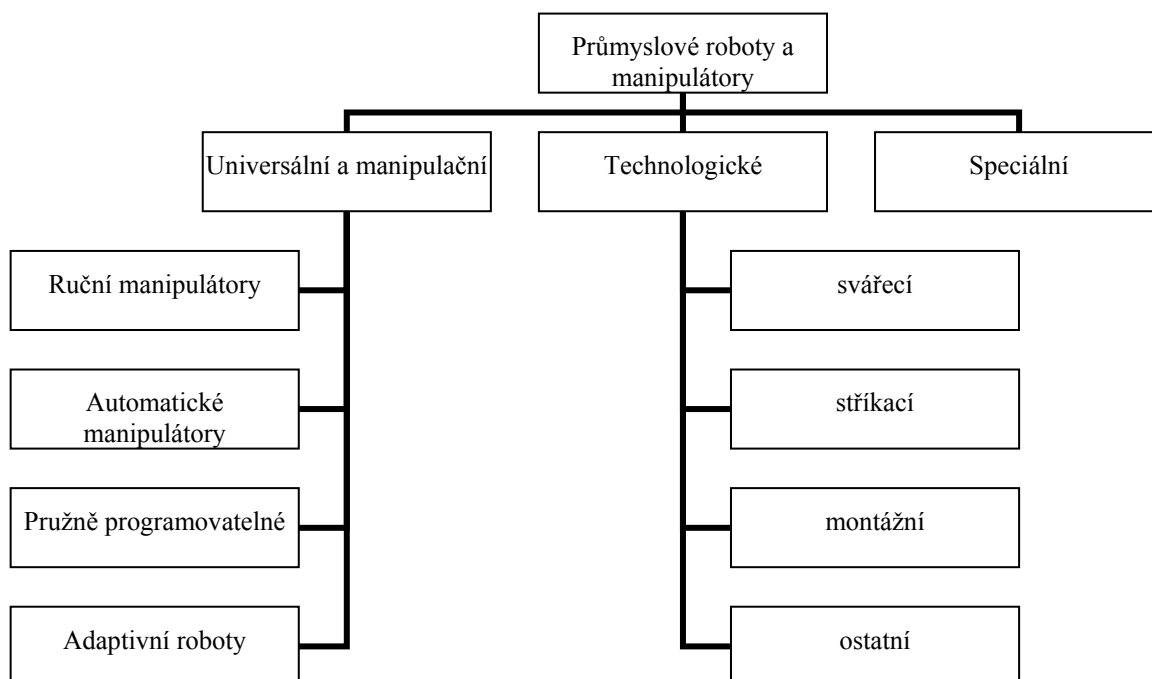


Obr. 2: Rozdělení manipulační zařízení²

¹ Mañas, M. *Základy robotiky*, s. 7.

² Mañas, M. *Základy robotiky*, s. 8.

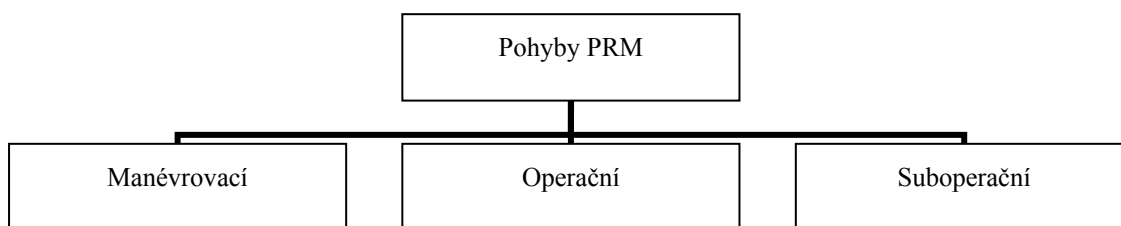
Dále tyto roboty můžeme rozdělit podle jejich použití. Toto rozdělení je zobrazeno na obr. 3.



Obr. 3: Rozdělení PRaM podle jejich použití³

3.2 Kinematická struktura

Pohyb robota zajišťuje jeho motorický systém a to takovým způsobem, aby robot vykonal tři základní druhy pohybů, a to manévrovací, operační a suboperační, podle obr. 4.



Obr. 4: Pohyby PRaM⁴

3.2.1 Pohyb manévrovací

Manévrovací pohyby jsou takové, které umožňují přesuny na větší vzdálenosti než jsou celkové rozměry robota. Tyto pohyby umí vykonat takový robot, který se svou

³ Mañas, M. *Základy robotiky*, s. 9.

⁴ Mañas, M. *Základy robotiky*, s. 13.

konstrukci může sám pohybovat v jeho pracovním prostředí. Tento pohyb je dominantní u skupiny mobilních robotů.⁵

3.2.2 Pohyb operační

Operační pohyb je takový, který umožňuje robotovi nátačet jeho koncový bod neboli chapadlo do libovolných pozic. Velikost pracovního prostředí je omezena rozměry robota a rozsahy pohybu jsou srovnatelné s jeho rozměry. Operační pohyb umožňuje vytvářet polohovací podsystem.⁶

3.2.3 Pohyb suboperační

Suboperační pohyb, umožňuje jednotlivým částem robota vysouvat či natáčet jeho koncový bod vzhledem k manipulovanému objektu. Rozsah pohybu je řádově menší než rozměry robota a rozměry robota jsou srovnatelné s rozměry koncového bodu neboli chapadla. Do suboperačního pohybu můžeme zařadit následující pohyby: zdvih čelistí chapadla, krátké orientační pohyby, natočení chapadla a další.⁷

3.3 Základní stavba

Základem stavby jsou nejrůznější mechanismy, které slouží k transformaci pohybů a přenosu sil. Mechanismy jsou tvořeny z navzájem utvořených spojených kinematických dvojic (členů), které jsou upevněny na nepohyblivém členu, kterému se říká rám. Jednotlivé kinematické dvojice mezi sebou vykonávají dva nejzákladnější pohyby a to translaci (posuv) a rotaci.

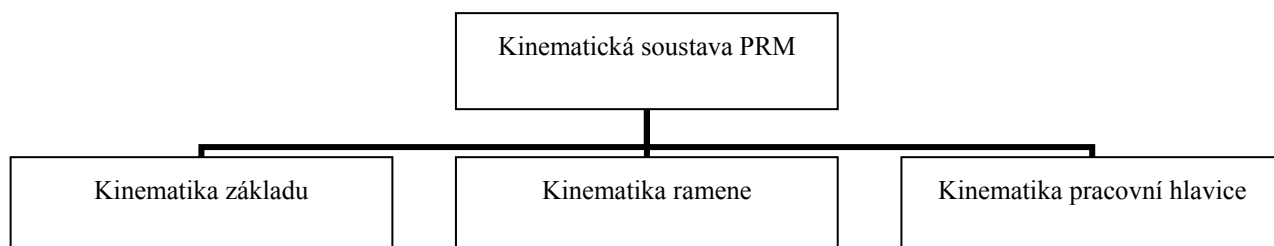
⁵ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 27.

⁶ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 27.

⁷ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 28.

3.4 Kinematická dvojice

Průmyslový robot a manipulátor je specifický svým uspořádáním kinematických dvojic. Toto specifické uspořádání do značné míry ovlivňuje manipulační možnosti robota. Základní uspořádání kinematické soustavy můžeme vidět na obr. 5.

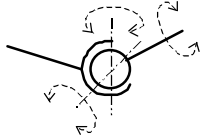
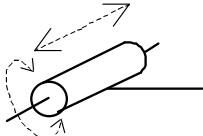
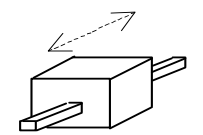
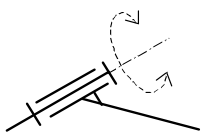
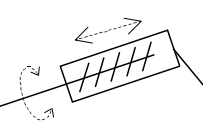
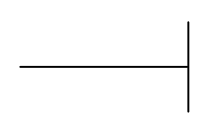


Obr. 5: Kinematická soustava⁸

Základní kinematické dvojice jsou uvedeny v tab.1, každá kinematická dvojice odebírá určitý počet stupňů volnosti tělesa.

Druh kinematické dvojice			Geometrie styku	Kinematika styku		Statika styku
Třída	Název	Schéma	Stykový útvar	Možný nezávislý pohyb	Počet °V	Počet složek reakcí
1	obecná		bod	2 posuvy po ploše a 3 rotace	5	1
2	křivková		bod	1 posuv po křivce a 3 rotace	4	2
	válcová		přímka	2 posuvy a 2 rotace		
3	rovinná		rovina	2 posuvy a 1 rotace	3	3

⁸ Mañas, M. *Základy robotiky*, s. 17.

	sférická		kulová plocha	3 rotace		
4	rotačně posuvná		válcová plocha	1 posuv 1 rotace	2	4
5	posuvná		rovinné plochy	1 posuv	1	5
	rotační		válcová plocha	1 rotace		
	šroubová		šroubová plocha	1 rotace nebo 1 posuv		
6	nepohyblivé spojení		obecná plocha	žádný	0	6

Tab. 1: Kinematická dvojice⁹

Celkový počet stupňů volnosti se vypočítá podle následujícího vztahu:¹⁰

$$W_{sr} = 6 - \left[\sum_{k=1}^6 k \cdot p_k - p_z \right], \text{ kde} \quad (1)$$

k – druh vazby ($k = 1, 2, \dots, 6$)

p_k – počet vazeb odnímajících tělesu k stupňů volnosti

p_z – počet ztracených vazeb (např. rotační kinematická dvojice)

Z tohoto vztahu dostaneme W_{sr} , podle kterého určíme zda je těleso staticky určité či neurčité, je – li:

⁹ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 14.

¹⁰ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 9.

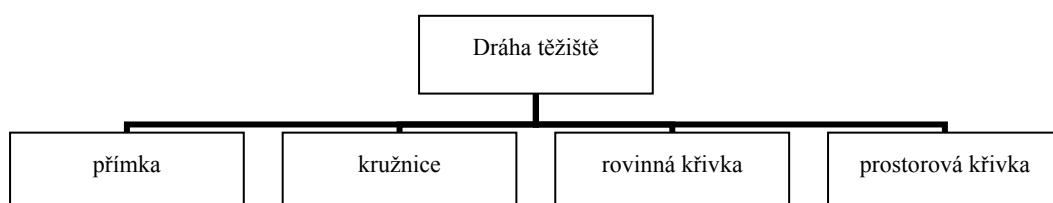
$W_{sr} = 0$, je těleso uloženo nepohyblivě, staticky určitě,

$W_{sr} > 0$ a < 6 , je těleso uloženo pohyblivě, hledáme reakce a případné zatížení pro rovnováhu,

$W_{sr} < 0$, je těleso uloženo nepohyblivě, staticky neurčitě.

3.5 Pracovní prostor

Pomocí polohovacího ústrojí PRaM a jeho kinematického řetězce můžeme jednou nebo dvěma kinematickými dvojicemi přesunout těžiště T manipulovaného předmětu do požadované pozice. Na obr. 6. můžeme vidět nejzákladnější pohyby T.



Obr. 6: Dráha těžiště¹¹

U stacionárních robotů je toto ústrojí dominantním prvkem a v podstatě určuje typ robota s jeho manipulační schopností. Nejčastější skladba polohovacího ústrojí bývá následující:¹²

- PPP
- RPP, PRP, PPR
- RRP, RPR, PRR
- RRR

Podle typu polohovacího ústrojí se dá konkrétně určit, jaký prostor bude PRaM využívat. Využíváme sedm nejčastějších pracovních prostorů a to jsou následující:¹³

- robot kartézský (pravoúhlý)
- robot válcový (cylindrický)
- robot sférický

¹¹ Maňas, M. *Základy robotiky*, s. 18.

¹² Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 32.

¹³ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 32.

- robot kloubový
- robot SCARA
- robot kyvadlový
- robot SPINE

3.6 Přesnost polohování

Každá kinematická dvojice (člen) má určitou odchylku mezi požadovanou a skutečnou pozicí. Celková odchylka je pak určena součtem chyb v jednotlivých souřadnicích kinematického řetězce, tzn., že platí následující vztah:¹⁴

$$\Delta_c = \sum_{i=1}^n \Delta_i, \text{ kde } i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

n – počet kinematických dvojic řetězce

Nepřesnost polohy je dána součtem dílčích chyb:¹⁵

$$\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \text{ kde} \quad (3)$$

$$\Delta_x = x_{\max} - x_{\min} = x_2 - x_1,$$

$$\Delta_y = y_{\max} - y_{\min} = y_2 - y_1,$$

$$\Delta_z = z_{\max} - z_{\min} = z_2 - z_1$$

Pro pravoúhlý souřadnicový systém je pak celková chyba PR následující:

$$\Delta_c = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2}. \quad (4)$$

Pokud veškeré chyby jsou stejné, $\Delta_x = \Delta_y = \Delta_z = \Delta$, má celková chyba tento vztah:

$$\Delta_c = \Delta \cdot \sqrt{3} = 1,73\Delta. \quad (5)$$

¹⁴ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 33.

¹⁵ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 34.

V tab. 2., jsou uvedeny hodnoty celkových chyb jednotlivých robotů.

robot	$\Delta_c[\text{mm}]$
kartézský	0,17
válcový	2,83
sférický	4,10
kloubový	4,10
SCARA	2,83
kyvadlový	2,91

Tab. 2: Hodnoty chyb robotů¹⁶

Z tabulky je patrné, že nejpřesnější robot je kartézský, dále následuje robot válcový a robot SCARA. Dále se umístily roboty sférický a kloubový. Stejně hodnoty poukazují na to, že roboty mají stejný souřadnicový systém, ve kterém se pohybují.

4. Analýza úlohy manipulace

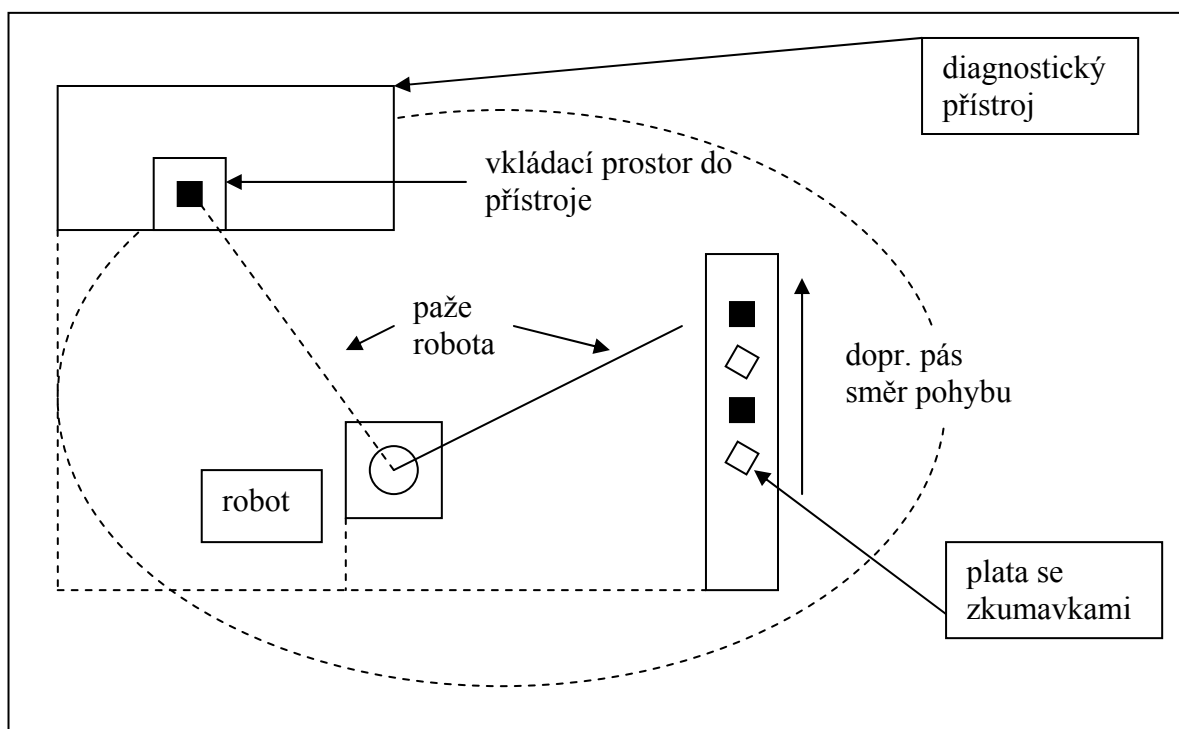
Analýza kinematiky PRaM je základem pro jejich další zkoumání, např. pro syntézu kinematického řetězce, přesnost PRaM a řešení dynamiky.¹⁷ V této kapitole navrhnu pracovní prostor a počet stupňů volnosti podle zadání úlohy. Úloha je stavěná jako volná, můžu si určit svůj pracovní prostor i kolik stupňů volnosti má mít robotická paže. S větším počtem stupňů volnosti stoupá také náročnost této úlohy. Na Pragomedice 2007, která se konala v dubnu letošního roku v Praze jsem informoval firmu Olympus o možnosti využití této automatické robotické paže při zakládání plat se zkumavkami nebo i samostatných zkumavek do jejich automatické linky. Tato automatická robotická paže by se dala využít i pro jiné typy automatické linek tak, aby se omezilo riziko infekce pro obsluhující personál těchto biolaboratořích.

¹⁶ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 45.

¹⁷ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 85.

4.1 Pracovní prostor

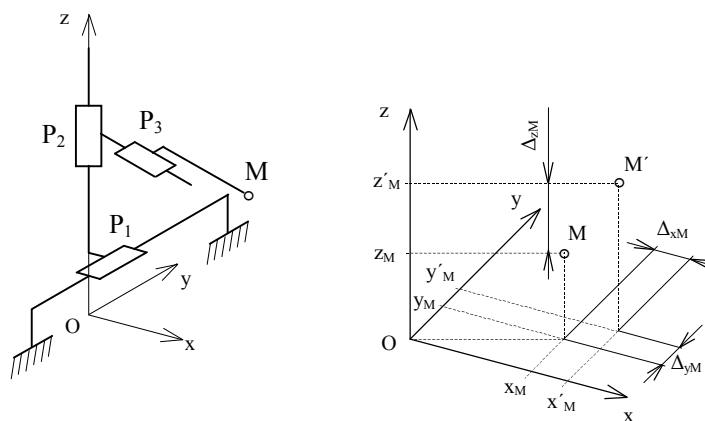
S ohledem na prostor pro automatickou linku a možnost manipulace robotické paže by se jednalo o 4° volnosti. Zdvih a otočení robotické paže, vysunutí robotické paže a natočení k uchopení zkumavky do chapadla (koncového bodu). Jednoduché schéma pracovního prostoru vidíme na obr. 10. Plata se zkumavkami nebo jednotlivé zkumavky by se pohybovaly po dopravním pásu, z kterého by robot odebíral jednotlivá plata nebo zkumavky a řadil by je do jednotlivých diagnostických přístrojů. Z tohoto zadání vyplývají 2 druhy pracovních prostorů a to robot kartézský a válcový. Diagnostické přístroje jsou v kartézských souřadnicích a osy x, y, z jsou navzájem kolmé. Z tohoto důvodu je vybrání pracovního prostoru o něco jednodušší.



Obr. 7: Schéma pracovního prostoru

4.1.1 Robot kartézský¹⁸

Nejzákladnější schéma kartézského robota je zobrazeno na obr. 7. Nejběžnější kinematické dvojice jsou v tomto pořadí P_y , P_z , P_x . Kinematické dvojice mohou být i jinak seřazeny, ale potom vzrůstá složitost konstrukce robota, hmotnost a setrvačnost. Koncový bod M (chapadlo) se v tomto případě nezmění a je určeno třemi vzdálenostmi od počátku X_M , Y_M , Z_M .



Obr. 8: Polohovací ústrojí kartézského robota¹⁹

Nevýhody:

Kartézský robot má své nevýhody v malé manipulační schopnosti, polohovací ústrojí může dosáhnout pouze volný prostor před robotem a pokud se objeví překážka, polohovací ústrojí není schopno manipulace za ní. Z ekonomického hlediska je tento druh robotů výrobně drahý, je třeba speciálních obráběcích strojů k výrobě jednotlivých součástí robota. Hlavní nevýhodou tohoto robota je to, že 3/4 prostoru kolem sebe nevyužívá.

Výhody:

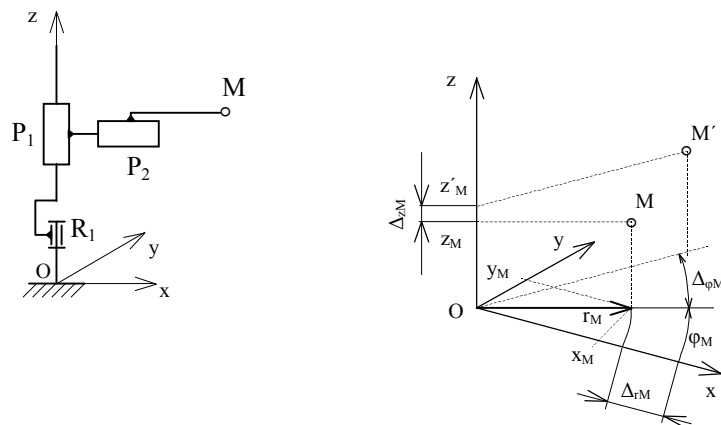
Kartézský robot má vysokou přesnost polohování a jednoduché řízení pohybu.

¹⁸ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 32.

¹⁹ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 33.

4.1.2 Robot válcový²⁰

Tato třída robotů je odvozena od válcového souřadnicového systému. Kinematické schéma polohovacího ústrojí robota je nakresleno na obr. 8. Nejběžnější struktura válcového robota je R_z, P_z, P_x nebo R_z, P_z, P_y .



Obr. 9: Polohovací ústrojí válcového robota²¹

Poloha koncového bodu M v základním souřadnicovém systému x, y, z je dána souřadnicemi X_M, Y_M, Z_M . Ve vztahném souřadnicovém systému je poloha dána dvěma délkovými a jednou úhlovou souřadnicí r_M, φ_M, z_M . Pokud je potřeba vyjádřit polohu danou ve válcovém souřadnicovém systému, použijeme transformační vztahy:

$$x_M = r_M \cdot \cos \varphi_M, \quad (6)$$

$$y_M = r_M \cdot \sin \varphi_M, \quad (7)$$

$$z_M = z_M \quad (8)$$

Nevýhody:

Válcové roboty mají malou manipulační schopnost. Přesnost polohování válcových robotů je menší, ale pro naši úlohu je tato přesnost zcela dostačující.

²⁰ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 35.

²¹ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 34.

Výhody:

Hlavní výhodou tohoto robota je základní úhel rotace, který činí $270 \div 320^\circ$ a to odpovídá možnosti pracovat na $2/3$ svého obvodu. Konstrukcí robota můžeme dokázat, že robot se může natáčet i o 360° a to n-krát a bez závislosti na směru rotace.

4.1.3 Vyhodnocení pracovního prostoru

Z těchto 2 pracovních prostorů jsem vybral s ohledem na úlohu manipulace a podle schématického nákresu pracovního prostoru na obr. 10 **válcový pracovní prostor**, protože konstrukce a výroba tohoto robota bude ekonomicky výhodná a snadná, jeho manipulační schopnosti jsou pro moji úlohu uspokojivé a to zejména úhel rotace $270 \div 320^\circ$.

4.2 Počet stupňů volnosti

S ohledem na úlohu manipulace a podle schématického nákresu pracovního prostoru na obr. 10 robot, diagnostický přístroj i dopravní pás a jejich příslušné souřadnicové systémy jsou navzájem kolmé, ale již nemůžeme předpokládat, že i umístění plat či jednotlivých zkumavek bude též kolmé na tyto souřadné systémy. Z tohoto důvodu musíme **volit 4° stupně volnosti**, aby se koncový bod M mohl natočit dle uložení plat na dopravním pásu a uchopit jej. Volím následující kinematický řetězec, který by měl splňovat veškeré požadavky podle zadání úlohy: přesnost polohování, dobrou manipulační schopnost a snadnou konstrukci. Výpočet provedeme podle následujícího vztahu:²²

$$W = 6 \cdot (n - 1) - \sum_{j=1}^5 j \cdot d_j, \text{ kde} \quad (9)$$

W - počet stupňů volnosti,

n - počet členů řetězce včetně rámu,

j - třída kinematické dvojice,

d_j – počet kinematických dvojic dané třídy

²² Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 24.

Kinematický řetězec:

Analýzou manipulace úlohy robota jsem došel k následujícím základním pohybům robota Translace v ose z, Rotace v ose z, Translace v ose y, Rotace v ose z.

Máme 5 členů, včetně členů rámu, počet kinematických dvojic $d = 4$ a použité kinematické dvojice jsou páté třídy $j = 5$ a výsledná rovnice počet stupňů volnosti:

$$W = 6 \cdot (n - 1) - \sum_{j=1}^5 j \cdot d_j = 6 \cdot (5 - 1) - 5 \cdot 4 = 4 \quad (10)$$

Počet stupňů volnosti $W = 4^\circ$, pro kinematický řetězec a danou manipulaci úlohy robota.

Mám zvolený pracovní prostor a získal jsem i počet stupňů volnosti kinematického řetězce, dále vytvořím kinematický model úlohy robota a tento model popíši parametrickými rovnicemi pohybu polohovacího ústrojí válcového robota tak, abych získal kompletní syntézu kinematického řetězce.

5. Syntéza kinematického řetězce

S ohledem na předchozí kapitulu *Analýza úlohy manipulace* se v této kapitole budu zabývat komplexní kinematikou mého kinematického řetězce (manipulátoru). Sestavím transformační matice, rychlostní matice a matice zrychlení.

5.1 Parametrické rovnice pohybu

Máme otevřený kinematický řetězec obsahující 5 členů včetně rámu. Na obr. 10 můžeme vidět kinematický řetězec robota. V každém tělese zvolím souřadnicový systém tak, aby jejich počátky a osy byly vhodně vázány na geometrii těles. V těchto zvolených souřadnicových systémech pak budu vyjadřovat rozměry příslušného členu, kinematické veličiny jeho pohybu. Souřadnicový systém v rámu, v mém případě je to prvé těleso, je pevný a k němu budu určovat pohybové charakteristiky ostatních těles. V pátém tělese je zvolen bod M, též koncový bod kinematického řetězce. Mým úkolem

je vyšetřit pohyb tohoto bodu M vůči rámu (prvé těleso) a ostatním tělesům. K popsání parametrických rovnic nám slouží tab. 4, která nám určuje matice základních pohybů, podle které budeme sestavovat parametrické rovnice pro jednotlivé pohyby a natočení v osách x, y, z.²³

základní pohyb	proměnná	směrová matice S	polohový vektor r	rychlost pohybu v	úhlová rychlost ω	dif.operátor D	dif.operátor D ²
posuv v ose x	x(t)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a + x(t) \\ b \\ c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
posuv v ose y	y(t)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a \\ b + y(t) \\ c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ \dot{y}(t) \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
posuv v ose z	z(t)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c + z(t) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
rotace v ose x	φ(t)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \omega_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
rotace v ose y	ψ(t)	$\begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ \omega_y \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
rotace v ose z	θ(t)	$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Tab. 3: Matice základních pohybů²⁴

²³ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 86.

²⁴ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 83.

5.1.1 Proměnné a konstantní souřadnice

Z obr. 10: určíme proměnné souřadnice a konstantní délkové rozměry:

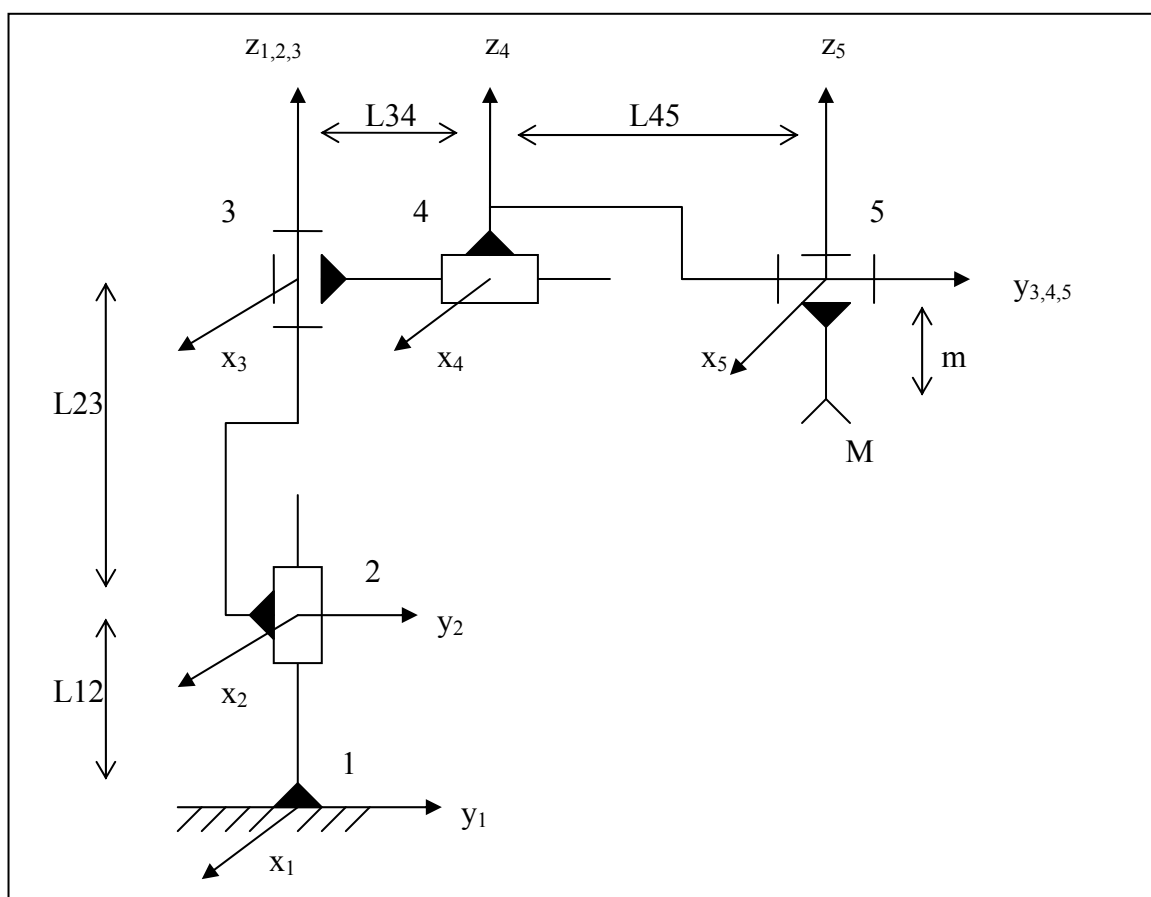
Proměnná: $L1, \varphi_{23}, L3, \varphi_{45}$

Konstanta: $K1, L23, K3, L45, m$,

z toho můžeme odvodit následující:

$$L12 = K1 + L1 \text{ a } L34 = K3 + L3$$

Tímto máme definované konstanty a proměnné, které budu používat pro danou úlohu manipulace.



Obr. 10: Kinematické řetězec

5.1.2 Polohové vektory středů souřadnicových systémů

Polohové vektory středů jednotlivých souřadnicových systémů určuje rozšířený polohový vektor, který je vyjádřen v homogeních souřadnicích a je konstantní.²⁵

$$\bar{\mathbf{r}}_n^{O_{n+1}} = [x_n, y_n, z_n, 1]^T, \quad (11)$$

a z toho vztahu můžeme odvodit pro mou úlohu manipulace jednotlivé polohové vektory středů:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{r}}_1^{O_2} &= [0, 0, L12, 1]^T, & \bar{\mathbf{r}}_4^{O_5} &= [0, L45, 0, 1]^T, \\ \bar{\mathbf{r}}_2^{O_3} &= [0, 0, L23, 1]^T, & \bar{\mathbf{r}}_5^M &= [0, 0, m, 1]^T, \\ \bar{\mathbf{r}}_3^{O_4} &= [0, L34, 0, 1]^T \end{aligned}$$

5.1.3 Pohyby jednotlivých členů

Z obr. 10 popíšeme jednotlivé pohyby členů paže

a) Pohyb tělesa 2 vůči tělesu 1:

Těleso 2 vůči tělesu 1 vykonává základní pohyb posuvný ve směru osy z_1 , tuto transformační matici můžeme nalézt v tab. 4 jako *posuv v ose z*.

b) Pohyb tělesa 3 vůči tělesu 2:

Těleso 3 vůči tělesu 2 vykonává základní pohyb rotační ve směru osy z_2 , tuto transformační matici můžeme nalézt v tab. 4 jako *rotace v ose z*.

c) Pohyb tělesa 4 vůči tělesu 3:

Těleso 4 vůči tělesu 3 vykonává základní pohyb posuvný ve směru osy y_3 , tuto transformační matici můžeme nalézt v tab. 4 jako *posuv v ose y*.

d) Pohyb tělesa 5 vůči tělesu 4:

Těleso 5 vůči tělesu 4 vykonává základní pohyb rotační ve směru osy z_4 , tuto transformační matici můžeme nalézt v tab. 4 jako *posuv ose z*.

²⁵ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 86.

5.1.4 Transformační matice základních pohybů

Podle tab. 4 a pomocí polohových vektorů souřadnicových systémů určíme transformační matice pro jednotlivé členy paže. V této úloze získáme rovnici pohybu bodu M vůči rámu (1) a transformační matici mezi členem 5 a rámem.

Budeme vycházet z následujícího vztahu:

$$\mathbf{T}_{n(n-1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{n(n-1)} & \mathbf{r}_{(n-1)}^{O_n} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \text{ kde} \quad (12)$$

n – n-tý člen řetězce

Podle tab. 4. určíme jednotlivé směrové matice a z předcházející kapitoly již známe polohové vektory středů souřadnicových systémů.

Transformační matice základních pohybů:

$$\mathbf{T}_{21} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{21} & \mathbf{r}_1^{O_2} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L12 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{T}_{32} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{32} & \mathbf{r}_2^{O_3} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi_{23} & -s\varphi_{23} & 0 & 0 \\ s\varphi_{23} & c\varphi_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{T}_{43} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{43} & \mathbf{r}_3^{O_4} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L34 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_{54} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{54} & \mathbf{r}_4^{O_5} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi_{45} & -s\varphi_{45} & 0 & 0 \\ s\varphi_{45} & c\varphi_{45} & 0 & L45 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Rovnice pohybu bodu M vůči rámu (těleso 1) bude:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{r}}_1^M = \mathbf{T}_{51} \cdot \bar{\mathbf{r}}_5^M = \mathbf{T}_{21} \cdot \mathbf{T}_{32} \cdot \mathbf{T}_{43} \cdot \mathbf{T}_{54} \cdot \bar{\mathbf{r}}_5^M &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L12 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\varphi_{23} & -s\varphi_{23} & 0 & 0 \\ s\varphi_{23} & c\varphi_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\ \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L34 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\varphi_{45} & -s\varphi_{45} & 0 & 0 \\ s\varphi_{45} & c\varphi_{45} & 0 & L45 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ m \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -s\varphi_{23} \cdot L45 - s\varphi_{23} \cdot L34 \\ c\varphi_{23} \cdot L45 + c\varphi_{23} \cdot L34 \\ m + L23 + L12 \\ 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

kde

$$\mathbf{T}_{51} = \begin{bmatrix} c(\varphi_{23} + \varphi_{45}) & -s(\varphi_{23} + \varphi_{45}) & 0 & -s\varphi_{23} \cdot L45 - s\varphi_{23} \cdot L34 \\ s(\varphi_{23} + \varphi_{45}) & c(\varphi_{23} + \varphi_{45}) & 0 & -c\varphi_{23} \cdot L45 - c\varphi_{23} \cdot L34 \\ 0 & 0 & 0 & L23 + L12 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

5.2 Rychlostní matice

Podobným způsobem jako při získání transformačních matic budeme postupovat i pro matice rychlostí základních pohybů. Vycházíme ze vzorce:²⁶

$$\bar{\mathbf{v}}_1^M = \dot{\mathbf{T}}_{n1} \cdot \bar{\mathbf{r}}_n^M = \mathbf{T}_{n1} \cdot \mathbf{V}_{n1_n} \cdot \bar{\mathbf{r}}_n^M, \quad (18)$$

kde pro jednotlivé kinematické členy dostáváme tyto vztahy:

$$\mathbf{V}_{21_2} = \mathbf{V}_{z2}(vL_{12}) = \mathbf{D}_{z2} \cdot v\dot{L}_{12} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega}_{21_2} & \mathbf{v}_2^{O_2} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & vL_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

²⁶ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 93.

$$\mathbf{V}_{32_3} = \mathbf{V}_{z3}(\varphi_{32}) = \mathbf{D}_{z3} \cdot \dot{\varphi}_{32} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Omega}_{32_3} & \mathbf{v}_3^{O_3} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{32} & 0 & 0 \\ -\omega_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\mathbf{V}_{43_4} = \mathbf{V}_{y4}(vL_{34}) = \mathbf{D}_{y4} \cdot v\dot{L}_{34} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Omega}_{43_4} & \mathbf{v}_4^{O_4} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & vL_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$\mathbf{V}_{54_5} = \mathbf{V}_{z5}(\varphi_{54}) = \mathbf{D}_{z5} \cdot \dot{\varphi}_{54} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Omega}_{54_5} & \mathbf{v}_5^{O_5} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{54} & 0 & 0 \\ -\omega_{54} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Dále určíme matice inverzních pohybů:

$$\mathbf{T}_{21}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{21}^T & -\mathbf{S}_{21}^T \cdot \mathbf{r}_1^{O_2} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L12 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

$$\mathbf{T}_{32}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{32}^T & -\mathbf{S}_{32}^T \cdot \mathbf{r}_2^{O_3} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi_{23} & s\varphi_{23} & 0 & 0 \\ -s\varphi_{23} & c\varphi_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

$$\mathbf{T}_{43}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{43}^T & -\mathbf{S}_{43}^T \cdot \mathbf{r}_3^{O_4} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -L34 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

$$\mathbf{T}_{54}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{54}^T & -\mathbf{S}_{54}^T \cdot \mathbf{r}_4^{O_5} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi_{45} & s\varphi_{45} & 0 & -s\varphi_{45} \cdot L45 \\ -s\varphi_{45} & c\varphi_{45} & 0 & -c\varphi_{45} \cdot L45 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Transformace matic rychlostí do systému 1.

$$\mathbf{V}_{21_1} = \mathbf{T}_{21}^{-1} \cdot \mathbf{V}_{21_2} \cdot \mathbf{T}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & vL12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{V}_{31_1} = \mathbf{T}_{21}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{32}^{-1} \cdot \mathbf{V}_{31_3} \cdot \mathbf{T}_{32} \cdot \mathbf{T}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{23} & 0 & 0 \\ \omega_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & vL12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{41_1} &= \mathbf{T}_{21}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{32}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{43}^{-1} \cdot \mathbf{V}_{41_4} \cdot \mathbf{T}_{43} \cdot \mathbf{T}_{32} \cdot \mathbf{T}_{21} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{23} & 0 & -2 \cdot c\varphi_{23} \cdot \omega_{23} \cdot L34 + s\varphi_{23} \cdot vL34 \\ \omega_{23} & 0 & 0 & 2 \cdot s\varphi_{23} \cdot \omega_{23} \cdot L34 + c\varphi_{23} \cdot vL34 \\ 0 & 0 & 0 & vL12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}_{51_1} &= \mathbf{T}_{21}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{32}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{43}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{54}^{-1} \cdot \mathbf{V}_{51_5} \cdot \mathbf{T}_{54} \cdot \mathbf{T}_{43} \cdot \mathbf{T}_{32} \cdot \mathbf{T}_{21} = \\
&= \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{23} - \omega_{45} & 0 \\ \omega_{23} + \omega_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (30) \\
&\quad \left[\begin{aligned} &-c\varphi_{23} \cdot \omega_{23} \cdot L34 - c\varphi_{23} \cdot L34 \cdot \omega_{45} - c(\varphi_{23} + \varphi_{45}) \cdot L45 \cdot \omega_{23} - \\ &-c(\varphi_{23} + \varphi_{45}) \cdot L45 \cdot \omega_{45} - \omega_{23} \cdot L45 \cdot c(\varphi_{23} + 2 \cdot \varphi_{45}) - \\ &- \omega_{23} \cdot L34 \cdot c(\varphi_{23} + 2 \cdot \varphi_{45}) + vL34 \cdot s(\varphi_{23} + 2 \cdot \varphi_{45}) \\ &s\varphi_{23} \cdot \omega_{23} \cdot L34 + s\varphi_{23} \cdot L34 \cdot \omega_{45} - s(\varphi_{23} + \varphi_{45}) \cdot L45 \cdot \omega_{23} + \\ &s(\varphi_{23} + \varphi_{45}) \cdot L45 \cdot \omega_{45} + \omega_{23} \cdot L45 \cdot s(\varphi_{23} + 2 \cdot \varphi_{45}) + \omega_{23} \cdot L34 \cdot s(\varphi_{23} + 2 \cdot \varphi_{45}) + \\ &+ vL34 \cdot c(\varphi_{23} + 2 \cdot \varphi_{45}) \end{aligned} \right] \\
&\quad \begin{matrix} vL12 \\ 0 \end{matrix}
\end{aligned}$$

Matice rychlosti výsledného pohybu:

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}_{51_5} &= \mathbf{V}_{21_5} + \mathbf{V}_{32_5} + \mathbf{V}_{43_5} + \mathbf{V}_{54_5} = \quad (31) \\
&= \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{23} - \omega_{45} & 0 & -c\varphi_{45} \cdot \omega_{23} \cdot L45 - c\varphi_{45} \cdot \omega_{23} \cdot L34 + s\varphi_{45} \cdot vL34 \\ \omega_{23} + \omega_{45} & 0 & 0 & -s\varphi_{45} \cdot \omega_{23} \cdot L45 - s\varphi_{45} \cdot \omega_{23} \cdot L34 + c\varphi_{45} \cdot vL34 \\ 0 & 0 & 0 & vL12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Výsledná rychlost bodu M vůči rámu 1:

$$\begin{aligned}
\bar{\mathbf{v}}_1^M &= \mathbf{T}_{51} \cdot \mathbf{V}_{51_1} \cdot \bar{\mathbf{r}}_5^M = \quad (32) \\
&= \begin{bmatrix} -2 \cdot c\varphi_{45} \cdot \omega_{23} \cdot L34 - c\varphi_{45} \cdot \omega_{23} \cdot L45 + s\varphi_{45} \cdot vL34 - L45 \cdot \omega_{45} - \omega_{23} \cdot L45 \cdot c(2 \cdot \varphi_{23} + \varphi_{45}) - \\ - \omega_{23} \cdot L34 \cdot s(2 \cdot \varphi_{23} + \varphi_{45}) - L45 \cdot \omega_{45} \cdot s(2 \cdot \varphi_{23} + \varphi_{45}) - L34 \cdot \omega_{45} \cdot s(2 \cdot \varphi_{23} + \varphi_{45}) - \\ vL12 \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\left[\begin{aligned} & -\omega_{23} \cdot L_{34} \cdot c(2 \cdot \varphi_{23} + \varphi_{45}) - L_{45} \cdot \omega_{45} \cdot c(2 \cdot \varphi_{23} + \varphi_{45}) - L_{34} \cdot \omega_{45} \cdot c \varphi_{45} - \\ & - L_{34} \cdot \omega_{45} \cdot c(2 \cdot \varphi_{23} + \varphi_{45}) - \omega_{23} \cdot L_{45} \\ & - L_{34} \cdot \omega_{45} \cdot s \varphi_{45} + c \varphi_{45} \cdot \nu L_{34} - \omega_{23} \cdot L_{45} \cdot s(2 \cdot \varphi_{23} + \varphi_{45}) + s \varphi_{45} \cdot \omega_{23} \cdot L_{45} \end{aligned} \right]$$

5.3 Odvození Jakobiánu

Jakobián popisuje transformaci souřadnic (x, y) a (r, φ) . Jde o popis transformace mezi souřadnicovými systémy $O_{x,y}$ a M_{x_m, y_m} . Řízení je založeno na Jakobiánu J transformace vyjadřující přepočít mezi rychlostmi bodu M v souřadnicích (\dot{x}, \dot{y}) a $(\dot{r}, \dot{\varphi})$. Považujeme-li souřadnice bodu A v okamžiku manipulace za konstantní, vyjadřuje rovnice:²⁷

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(r, \varphi) \\ y(r, \varphi) \end{bmatrix} \quad (33)$$

Přechodem k rychlostem dostaneme

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \quad (34)$$

a přepsáno vektorově pro $u = [x, y]^T$ a $\Phi = [r, \varphi]^T$

$$\dot{u} = J(\Phi) \cdot \dot{\Phi} \quad (35)$$

Inverzní Jakobián dostaneme

$$\dot{\Phi} = J(\Phi)^{-1} \cdot \dot{u} \quad (36)$$

Tento vztah musíme nyní rozšířit pro danou úlohu manipulace. Matice Jakobiánu je velice rozsáhlá a proto ji zde neuvádím. Tato matice je v m-file: *jacobian.m* v adresáři simulace.

²⁷ Valášek, M. a kol. *Mechatronika*, s. 47

5.4 Matice zrychlení²⁸

Matice částečného zrychlení základních pohybů určíme pomocí tab. 4. Rozsah těchto matic je mnohokrát větší než dosavadní uvedené matice a proto je zde nebudu uvádět. V programu MATLAB si můžeme spustit m-file: *kinematika.m*, který se nachází na příloženém CD v adresáři simulace. Zde uvedu pouze maticový zápis z kterých jsem vycházel při zadávání do programu.

Transformace matic neúplného zrychlení do systému tělesa 5:

$$\mathbf{A}_{21_5} = \mathbf{T}_{54}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{43}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{32}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{21_2} \cdot \mathbf{T}_{32} \cdot \mathbf{T}_{43} \cdot \mathbf{T}_{54} = \text{mfile : kinematika.m}$$

$$\mathbf{A}_{32_5} = \mathbf{T}_{54}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{43}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{32_3} \cdot \mathbf{T}_{43} \cdot \mathbf{T}_{54} = \text{mfile : kinematika.m}$$

$$\mathbf{A}_{43_5} = \mathbf{T}_{54}^{-1} \cdot \mathbf{A}_{43_4} \cdot \mathbf{T}_{54} = \text{mfile : kinematika.m}$$

Matice Résalova zrychlení:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{R_5} = & (\mathbf{V}_{21_5} \cdot \mathbf{V}_{54_5} - \mathbf{V}_{54_5} \cdot \mathbf{V}_{21_5}) + (\mathbf{V}_{21_5} \cdot \mathbf{V}_{43_5} - \mathbf{V}_{43_5} \cdot \mathbf{V}_{21_5}) + \\ & + (\mathbf{V}_{21_5} \cdot \mathbf{V}_{32_5} - \mathbf{V}_{32_5} \cdot \mathbf{V}_{21_5}) + (\mathbf{V}_{32_5} \cdot \mathbf{V}_{54_5} - \mathbf{V}_{54_5} \cdot \mathbf{V}_{32_5}) + \\ & + (\mathbf{V}_{32_5} \cdot \mathbf{V}_{43_5} - \mathbf{V}_{43_5} \cdot \mathbf{V}_{32_5}) + (\mathbf{V}_{43_5} \cdot \mathbf{V}_{54_5} - \mathbf{V}_{54_5} \cdot \mathbf{V}_{43_5}) = \\ & = \text{mfile : kinematika.m} \end{aligned}$$

Matice neúplného zrychlení výsledného pohybu:

$$\mathbf{A}_{51_5} = \mathbf{A}_{21_5} + \mathbf{A}_{32_5} + \mathbf{A}_{43_5} + \mathbf{A}_{54_5} + \mathbf{A}_{R_5} = \text{mfile : kinematika.m}$$

Určíme kvadrát rychlosti $\mathbf{V}_{51_5}^2$:

$$\mathbf{V}_{51_5}^2 = \mathbf{V}_{51_5} \cdot \mathbf{V}_{51_5} = \text{mfile : kinematika.m}$$

Matice úplného zrychlení:

$$\mathbf{B}_{51_5} = \mathbf{A}_{51_5} + \mathbf{V}_{51_5}^2 = \text{mfile : kinematika.m}$$

²⁸ Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*, s. 113.

Vektor výsledného zrychlení bodu M vůči rámu (1):

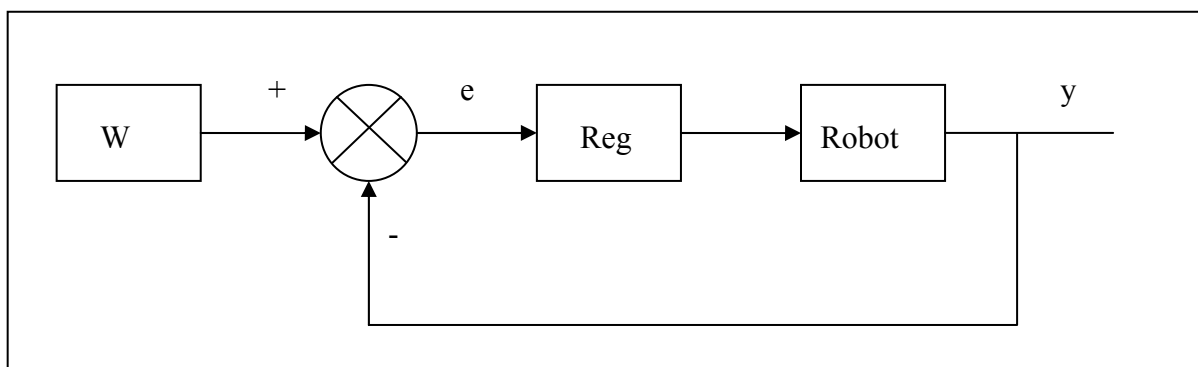
$$\bar{\mathbf{a}}_1^M = \mathbf{T}_{s1} \cdot \mathbf{B}_{s1s} \cdot \bar{\mathbf{r}}_s^M = mfile : kinematika.m$$

6. Simulace

V předchozích kapitolách jsem udělal analýzu a syntézu úlohy manipulace automatické paže robota. V této kapitole navrhnou zákon řízení úlohy manipulace automatické paže a tím si ověřím, že jsem správně analyzoval úlohu a provedl správnou syntézu dané úlohy.

6.1 Zákon řízení

Pro danou úlohu manipulace automatické paže jsem vybral zpětnovazební systém, kterému říkáme regulace.²⁹ Při tomto způsobu řízení řídicí člen nebo-li regulátor využívá informace o výsledku řízení. Základní schématické uspořádání je na obr. 11. Z tohoto schématu budu vycházet a implementuji tento zpětnovazební systém pro danou úlohu manipulace paže robota.



Obr. 11: Zpětnovazební systém

kde

W – vstupní veličina do systému

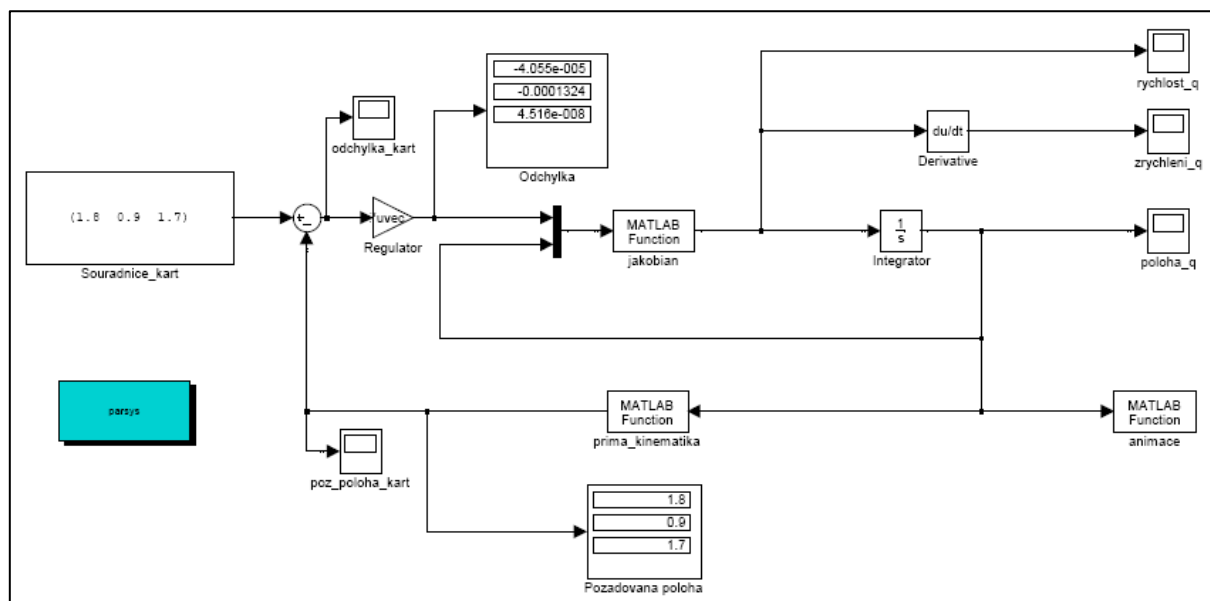
e – odchylka, $e = W - y$

Reg – zesílení vstupní veličiny, regulátor

$Robot$ – blok, který dá impuls k vykonání požadované veličiny

²⁹ Valášek, M. a kol. *Mechatronika*, s. 82

6.2 Blokové schéma simulace



Obr. 12: Blokové schéma

6.2.1 Popis blokového schématu

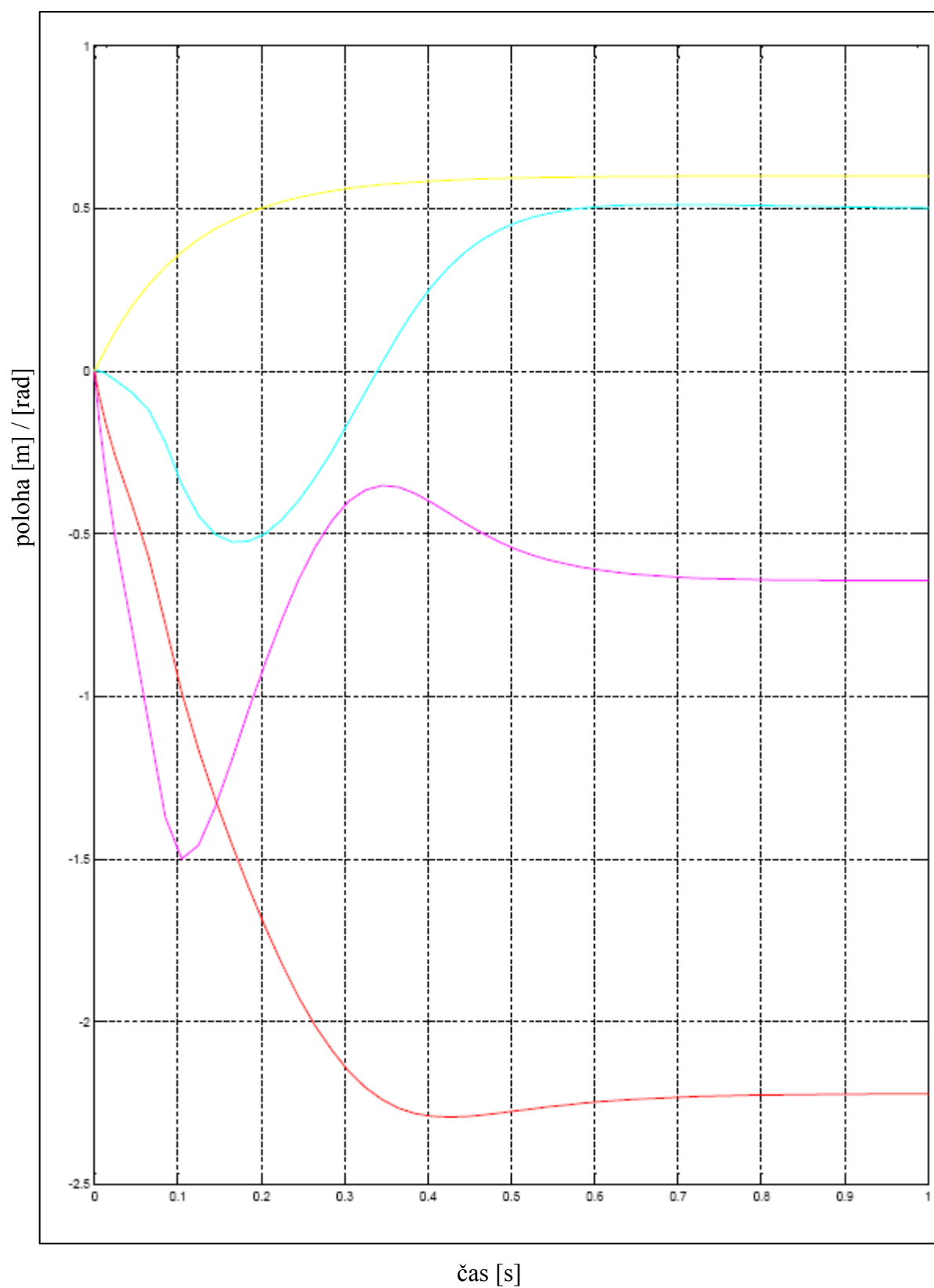
Na vstupu mám požadované kartézské souřadnice, ty vstupují do bloku regulátoru, který nám tyto kartézské souřadnice zesílí jako rychlosti v kartézských souřadnicích. Dále smyčka pokračuje do funkce: *jakobian.m*. Využil jsem nastavby programu Matlab – Simulink k volání MATLAB Function. Tento program nám pomocí transformace jakobiánu převádí již zmíněnou rychlost v kartézských souřadnicích do rychlosti v zobecněných souřadnicích. Derivací rychlosti dostáváme zrychlení zobecněných souřadnic a integrací získáváme polohu v zobecněných souřadnicích. Z rychlosti zobecněných souřadnic dále pokračujeme zpětnou vazbou do funkce: *prima_kinematika.m*. Tato funkce nám převádí rychlost v zobecněných souřadnicích do kartézských souřadnic. Touto funkcí jsme uzavřeli zpětnovazební systém.

Dle obr. 12 je použito volání MATLAB funkcí a to následující: *jakobian.m*, *prima_kinematika.m*, *parsys.m*, *animace.m*, tyto programy vypisují pro kontrolu v přílohách. Samotný model *simulace.mdl* a též zmíněné m-soubory nalezneme na příloženém CD v adresáři simulace. Tyto funkce jsem programoval pomocí následující literatury.³⁰³¹³²

³⁰ Karban, P. *Matlab a Simulink*

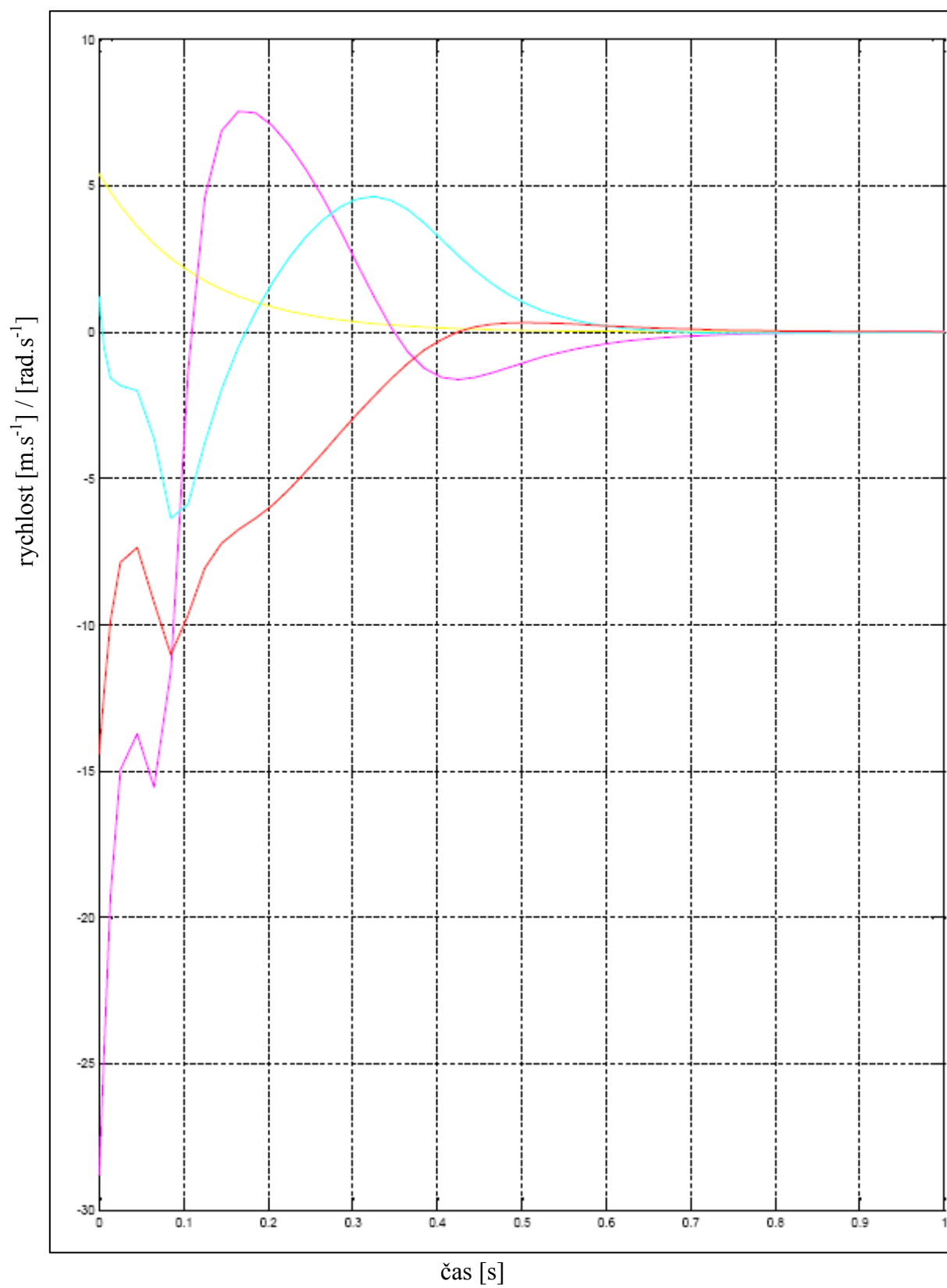
³¹ Zaplatílek, K., Doňar, B. *Matlab - pro začátečníky*

6.3 Poloha v zobecněných souřadnicích

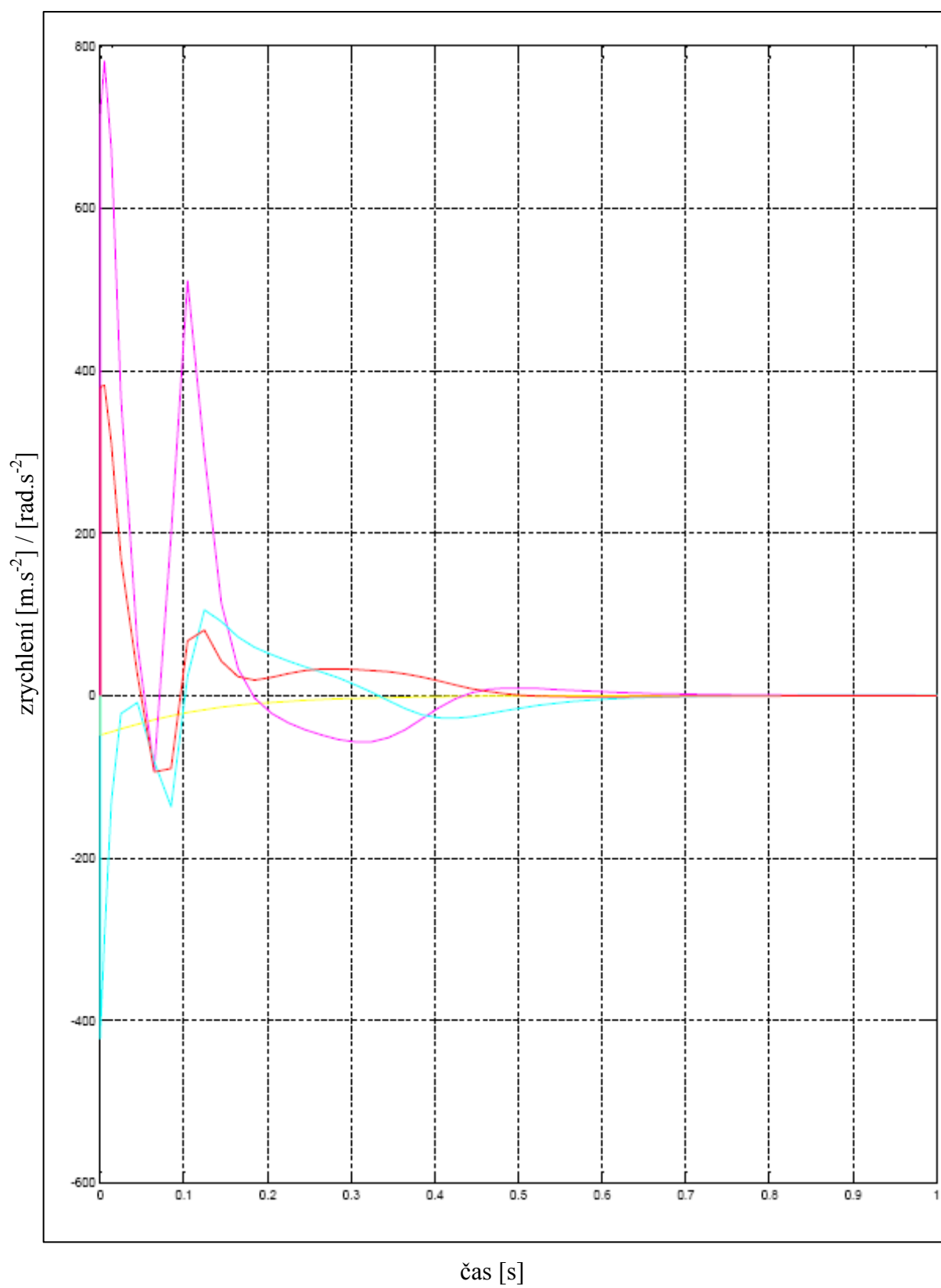


³² Zaplatílek, K., Doňar, B. *Matlab – tvorba uživatelských aplikací*

6.4 Rychlost v zobecněných souřadnicích



6.5 Zrychlení v zobecněný souřadnicích



7. Závěr

Celá tato bakalářská práce se zabývala problematikou otevřených kinematických řetězců. Nastudoval jsem a popsal jsem jednotlivé druhy pracovních prostorů, kinematické dvojice, jednotlivé pohyby PRaM.

S ohledem na analýzu manipulace robotické paže jsem vytvořil kinematický model úlohy robota a tento model jsem popsal parametrickými rovnicemi pohybu polohovacího ústrojí válcového robota. Syntézou úlohy manipulace jsem se zabýval komplexní kinematikou mého kinematického řetězce (robotické paže). Sestavil jsem transformační matice, rychlostní matice a matice zrychlení.

V simulaci jsem navrhnul zpětnovazební zákon řízení pro moji úlohu a tímto jsem si ověřil, že můj kinematický řetězec robotické paže na základě analýzy a syntézy pracuje správně na základě mých výpočtů.

Seznam použité literatury

- [1] Kauler, J., Fischer, J., Kacer, J. *Kinematika pohybu robotických systémů*. Brno: Skripta VA Brno, 2004.
- [2] Valášek, M. a kol. *Mechatronika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01276-X
- [3] Maňas, M. *Základy robotiky*. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1991. 99 s.
- [4] Karban, P. *Matlab a Simulink*. Brno: Computer Press, 2006. 1. vyd. 214 s. ISBN 80-251-1301-9
- [5] Zaplatílek, K., Doňar, B. *Matlab - pro začátečníky*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 2. vyd. 152 s. ISBN 80-7300-175-6
- [6] Zaplatílek, K., Doňar, B. *Matlab – tvorba uživatelských aplikací*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. 1. vyd. 216 s. ISBN 80-7300-133-0
- [7] Oplatek, F., Luner M., Osoba J., Svoboda K., Šmejkal L., *Automatizace a automatizační technika IV*. Praha: Computer Press, 2000. 1. vyd. 166 s. ISBN 80-7226-249-1
- [8] Pražák, J., *Úvod do biomechaniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. Skripta fakulty strojní
- [9] Holčík, J., Fojt, O., *Modelování biologických systémů (vybrané kapitoly)*, Brno: VUT v Brně, fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav biomedicínského inženýrství, 2001. 1. vyd. 120 s. ISBN 80-214-2023-5

8. Přílohy

8.1 Script jakobian.m

Vstupem do tohoto bloku jsou kartézské souřadnice rychlosti a výstupem je rychlost v zobecněných souřadnicích.

```
function zobecrychlost=jakobian(souradnice);

ex=souradnice(1)
ey=souradnice(2)
ez=souradnice(3)

L12=souradnice(4)
fi23=souradnice(5)
L34=souradnice(6)
fi45=souradnice(7)

m = 0.5;
L12 = 1;
L23 = 1;
L34 = 1;
L45 = 1;

J = [0 -cos(fi23)*L34-cos(fi23+fi45)*L45-L45*cos(fi23+2*fi45)-L34*cos(fi23+2*fi45) 1/
sin(fi23+2*fi45) -cos(fi23)*L34-cos(fi23+fi45)*L45;
      0 sin(fi23)*L34+sin(fi23+fi45)*L45+L45*sin(fi23+2*fi45)+L34*sin(fi23+2*fi45) cos1/
(fi23+2*fi45) sin(fi23)*L34+sin(fi23+fi45)*L45;
      1 0 0 0;
      0 0 0 0;
      0 0 0 0;
      0 1 0 1]

kart=[ex;ey;ez;0;0;0];

akce=J'*kart
zobecrychlost=[akce]
end
```

8.2 Script prima_kinematika.m

Vstupem do tohoto bloku je rychlost v zobecněných souřadnicích a výstupem je rychlost v kartézských souřadnicích

```
function kartpoloha=prima_kinematika(zobecnene);

m = 0.5;
L12 = 1;
L23 = 1;
L34 = 1;
L45 = 1;

r5M=[0;0;m;1];

L12=zobecnene(1)
fi23=zobecnene(2)
L34=zobecnene(3)
fi45=zobecnene(4)

TT51 = [cos(fi23)*cos(fi45)-sin(fi23)*sin(fi45) -cos(fi23)*sin(fi45)-sin(fi23)*cos(fi45) 0 -sin(fi23)*L45-sin(fi23)*L34;
        sin(fi23)*cos(fi45)+cos(fi23)*sin(fi45) cos(fi23)*cos(fi45)-sin(fi23)*sin(fi45) 0 cos(fi23)*L45+cos(fi23)*L34;
        0 0 1 L23+L12;
        0 0 0 1];

S51=TT51(1:3,1:3);

pol=TT51*r5M;
pol2=pol(1:3,:)
kartpoloha=[pol2];
end
```

8.3 Script animace.m

Tento script nám zobrazuje aktuální pozici kinematického řetězce robota

```
% animace pohybu manipulátoru
function animace(u)
global htm hbm

m = 0.5;
L12 = 1;
L23 = 1;
L34 = 1;
L45 = 1;
fi23 = 0.3;
fi45 = 0.6;

L12 = u(1); fi23 = u(2); L34 = u(3); fi45 = u(4);

rm = [0 0 0; 0 0 L12; 0 0 L23+L12;
      -sin(fi23)*L34 cos(fi23)*L34 L23+L12;
      -sin(fi23)*L45-sin(fi23)*L34 cos(fi23)*L45+cos(fi23)*L34 L23+L12;
      (-cos(fi23)*sin(fi45)-sin(fi23)*cos(fi45))*m-sin(fi23)*L45-sin(fi23)*L34 (cos(fi23)*cos(fi45)-sin(fi23)*sin(fi45))*m+cos(fi23)*L45+cos(fi23)*L34 L23+L12];

for ii=1:3
set(htm(ii), 'XData', [rm(ii:ii+1,1)], ...
    'YData', [rm(ii:ii+1,2)], ...
    'ZData', [rm(ii:ii+1,3)], 'Color', [0 0 1]);
end

for ii=1:4
set(hbm(ii), 'XData', [rm(ii,1)], ...
    'YData', [rm(ii,2)], ...
    'ZData', [rm(ii,3)], 'Color', [1 0 0]);
end
```

8.4 Script parsys.m

Tento script nám nastavuje počáteční polohu paže, odkud se bude dále přemisťovat do požadované polohy pro uchopení plata

```
clear
close all
global htm hbm

% Počáteční poloha manipulátoru
m = 0.5;
L12 = 1;
L23 = 1;
L34 = 1;
L45 = 1;
fi23 = 0.3;
fi45 = 0.6;

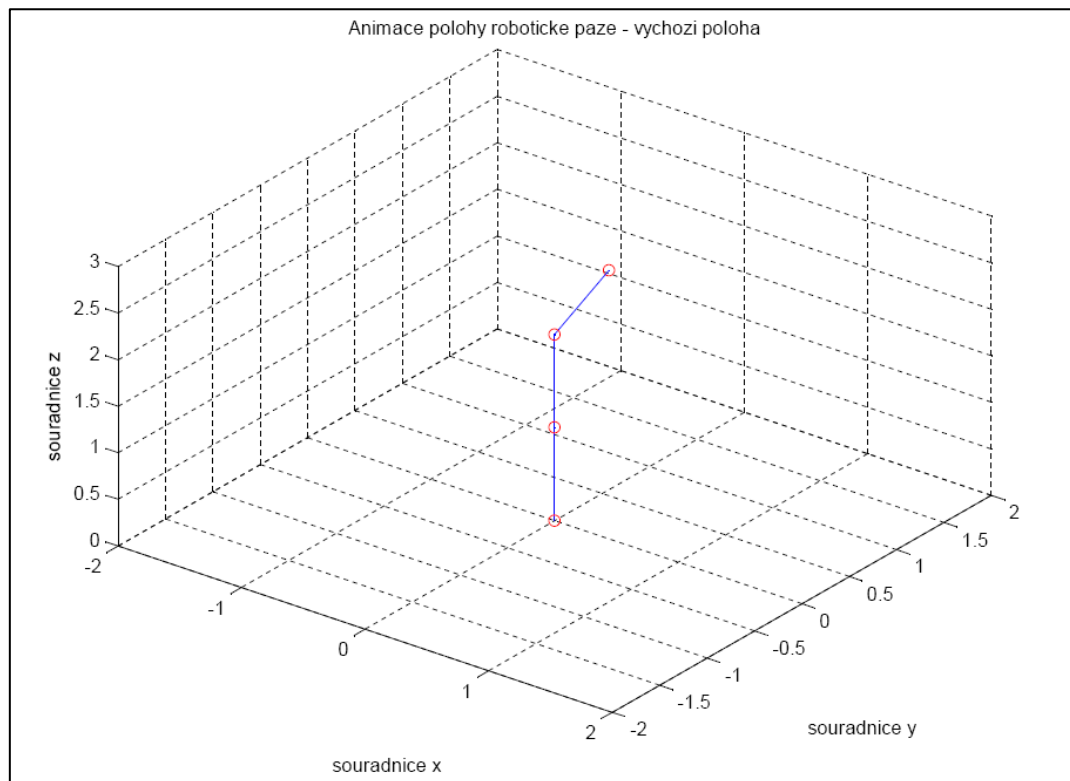
%Grafika 1- počáteční vytvoření obrázku.
close all
figure(1)
clf
axis('on');
set(0, 'defaultfigurecolor', 'K')
aaa=get(gcf, 'CurrentAxes');
set(aaa, 'XLim', [-2 2], 'YLim', [-2 2], 'ZLim', [0 3]);
set(gcf, 'Color', 0.9*[1 1 1]);
set(aaa, 'PlotBoxAspectRatio', [1 1 0.5]);
set(aaa, 'CameraPosition', [ 8.52 -11.107 11.77 ]);
set(aaa, 'Position', [0.12 0.11 0.775 0.815]);
set(gcf, 'Position', [461 72 537 320]);
set(gcf, 'Name', 'Manipulátor');
grid on
axis('on');
hold on

% Kreslení schématu manipulátoru
rm = [0 0 0; 0 0 L12; 0 0 L23+L12;
      -sin(fi23)*L34 cos(fi23)*L34 L23+L12;
      -sin(fi23)*L45-sin(fi23)*L34 cos(fi23)*L45+cos(fi23)*L34 L23+L12;
      (-cos(fi23)*sin(fi45)-sin(fi23)*cos(fi45))*m-sin(fi23)*L45-sin(fi23)*L34 (cos(fi23)*cos(fi45)-sin(fi23)*sin(fi45))*m+cos(fi23)*L45+cos(fi23)*L34 L23+L12];

for ii=1:3
    htm(ii)=plot3(rm(ii:ii+1,1),rm(ii:ii+1,2),...
                  rm(ii:ii+1,3), 'b');
end
for ii=1:4
    hbm(ii)=plot3(rm(ii,1),rm(ii,2),rm(ii,3), 'ro');
end
disp('Parametry systému - OK')
```

8.5 Simulace

8.5.1 Počáteční poloha



8.5.2 Požadovaná poloha

